第38卷 第4期
2021年7月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

毛乌素沙地不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸的季节变化特征

王荣女

(国家林业和草原局西北调查规划设计院,陕西 西安 710048)

摘 要: 2018年以毛乌素沙地西南部发育良好的苔藓结皮和藻类结皮为研究对象,以流沙作为对照,采用土壤碳通量测定,系统观测了不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的日动态,探讨了生物土壤结皮-土壤呼吸与环境因子之间的关系,分析了季节变化对生物土壤结皮-土壤CO_2释放量和温度敏感性的影响。结果表明:(1) 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率均呈"单峰"曲线,但其峰值出现的时间存在差异,春季和夏季不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率峰值出现时间均为13:00左右,但冬季和秋季,藻类结皮-土壤和流沙呼吸速率出现时间为15:00左右,滞后于春季和夏季2 h。(2) 不同季节,不同类型生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量:苔藓结皮>藻类结皮>流沙,且达到显著水平($P<0.05$)。(3) 春季至冬季,生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量呈先增加后降低的趋势,主要表现为:夏季>春季>秋季>冬季,且达到显著水平($P<0.05$)。(4) 通过对不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率与环境因子的主成分分析,与5 cm土壤温度相比,2 cm土壤温度是不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的主要影响因子,其次为近地层空气湿度。(5) 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率与2 cm土壤温度的关系均可用指数模型较好的描述,以该函数为基础计算呼吸的温度敏感性,发现温度敏感性的变化范围为1.33~3.85;随季节的变化,温度敏感性呈先降低后升高的趋势:冬季>秋季>春季>夏季,即温度越高,生物土壤结皮-土壤呼吸的温度敏感性越低。

关键词: 生物土壤结皮; 不同季节; 呼吸; 毛乌素沙地; 温度敏感性

碳循环作为大气圈-生物圈-地圈相互联系的纽带,在地球的物质循环系统中占据核心的位置[1-2]。陆地生态系统碳收支作为全球碳循环的主要组成部分,其主要通过土壤呼吸的形式将土壤中的碳向大气转移,全球土壤呼吸作用产生的碳在68~100 $Pg\cdot a^{-1}$[3],占陆地生态系统碳循环的2/3[4-6]。目前,有关土壤呼吸的研究多集中于农田、森林和草地等生态系统[7-9],荒漠生态系统作为干旱、半干旱地区的重要组成部分,其碳储量为10×10^{15} g C,但因其生态环境较为恶劣,人口居住较少,有关土壤呼吸的研究较少,对全球碳收支的研究造成一定程度上的碳失汇[10-12]。

生物土壤结皮(Biological soil crusts,BSCs;也称生物结皮或微生物结皮)作为荒漠生态系统的重要组成部分,是由隐花植物(如苔藓、绿藻、蓝藻、地衣等)和土壤微生物通过其菌丝体、假根和代谢所产生的胞外分泌物等物质与土壤表层颗粒胶结形成的复合体,是干旱、半干旱地区的主要地表覆盖类型[13-16]。其覆盖度在全球干旱、半干旱地区达到了70%,参与并调节着许多生态过程,其存在可提高土壤的抗侵蚀性,改善土壤条件,对荒漠生态系统的恢复与维持具有十分重要的意义[17-31]。生物土壤结皮位于土壤与大气的交界,因自身独特的生物学特性,导致其可同时进行呼吸作用和光合作用,影响着荒漠生态系统的碳循环。目前,有关荒漠生态系统生物土壤结皮-土壤呼吸的研究主要集中于欧洲的温带草原、美国和以色列荒漠以及南北极等地区[32-33],且研究内容主要为生物土壤结皮-土壤呼吸

收稿日期: 2020-12-05; **修订日期**: 2021-03-16
基金项目: 国家重点研发国际合作项目(2016YFE0203400-05);国家自然科学基金面上项目(41971131);国家重点研发计划项目(2017YFC0504703);杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-08)
作者简介: 王荣女(1975-),女,高级工程师,主要从事生态保护与修复,森林资源监测与评估方面研究. E-mail: 474165762@qq.com

与生物因子(生物土壤结皮类型和组成)[34]、相关环境因子(如:水分、温度、光合有效辐射等)之间的关系[35-36]。目前对生物土壤结皮-土壤呼吸的报道较少,研究区域主要为腾格里沙漠沙坡头区、古尔班通古特沙漠和黄土高原等地区[37-42],主要集中于生物土壤结皮-土壤呼吸对模拟降雨和模拟增温的响应[9,43-47]、生物土壤结皮类型与土壤呼吸之间的关系[48-49]、生物土壤结皮-土壤呼吸对气候变化的响应等[38,50]方面。研究主要集中于温度较高的生长季(6—10月),而在温度较低的冬季和春季生物土壤结皮-土壤的呼吸往往被忽略,且在碳收支的估算中将该时间段内生物土壤结皮-土壤与大气的碳交换假设为零[9,51-52]。相关研究表明,在地中海地区,即使温度下降至-22 ℃藻类结皮仍可进行呼吸作用[53],即生物土壤结皮-土壤在低温环境呼吸作用不可忽视。目前,有关生物土壤结皮-土壤呼吸日动态的季节性变化研究还十分少见,且缺乏大量的长期野外观测数据。因此,对生物土壤结皮-土壤呼吸日动态的季节性变化研究,将为荒漠生态系统的碳估算提供可靠的数据支持。

本研究位于毛乌素沙地,以不同类型生物土壤结皮覆盖土壤为研究对象,观测了不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的日动态,同时结合相关环境因子,分析了不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的主要影响因子,探讨了生物土壤结皮-土壤呼吸温度敏感性对季节变化的响应,阐明生物土壤结皮-土壤呼吸在不同季节的变化特征,旨在为荒漠生态系统碳源汇准确评估提供一定的科学依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地处于陕西省榆林市和内蒙古自治区鄂尔多斯市的交界,位于中国北方农牧交错带,其面积约为4.22×10^4 km^2。本研究地处于内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克前旗,位于毛乌素沙地西南部(38°05′54″N,107°50′51″E),海拔高度为1340 m。该地区属于温带干旱、半干旱大陆性气候,风沙活动强烈,年平均风速为3.6 m·s^{-1},年平均降水量为265 mm(7—9月约占60%~80%),年平均蒸发量为2514.8 mm,年平均日照时间为2900 h,年均气温为7 ℃,最低月平均气温为-10.4 ℃,最高月平均气温为22.6 ℃,年平均空气相对湿度为52%,土壤主要为风沙土,地质较为疏松,营养物质含量丰富。

近年来,随着人类活动方式和活动范围的改变,导致中国荒漠化现象日益严重。从19世纪50年代,毛乌素沙地开始进行相关的治理工作,经过近70 a的治理与恢复,荒漠化土地面积已显著降低,形成了以灌木和一年生草本为主,多年生草本为辅,同时伴有大面积生物土壤结皮分布的荒漠生态系统。灌木主要以小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、臭柏(*Sabina vulgaris*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、白蒿(*Artemisia sieversiana*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳(*Salix cheilophila*)为主,一年生草本植物以灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、狗尾草(*Celosia argentea*)、沙葱(*Allium mongolicum*)虫实(*Corispermum hyssopifolium*)为主,多年生草本植物以细叶苦麦菜(*Ixeris gracilias*)、瓦松(*Orostachys fimbriatus*)、白前(*Cynanchum atratum*)、针茅(*Stipa capillata*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)为主,生物土壤结皮相关特征见表1。

表1 研究区生物土壤结皮基本特征(平均值±标准误)

Tab. 1 Basic characteristics of biological soil crust in the study area (mean±SE)

结皮类型	盖度/%	厚度/cm	生物量/(mg·cm^{-2})
苔藓结皮	>30	1.56 ± 0.03	4.73 ± 0.41
藻类结皮	>35	1.03 ± 0.04	3.57 ± 0.16

2 研究方法

2.1 样地设置

试验于2017年的冬季(1月23日)、2018年的春季(4月18日)、夏季(7月19日)和秋季(10月15日)进行,根据生物土壤结皮的演替规律,同时结合当地生物土壤结皮发育情况,选取人为干扰较少且发育良好的生物土壤结皮(苔藓结皮和藻类结皮,结皮盖度保持在90%以上)为试验对象,并以流沙作为对照,为避免植物根系对生物土壤结皮-土壤呼吸的影响,在远离植物根系分布,距植株基部2 m以外设置实验样地。在样地内,随机设置3个2 m×2 m的样方,分别为苔藓结皮样方、藻类结皮样方和流

沙样方，采用直径20 cm，高10 cm的PVC环进行生物土壤结皮-土壤呼吸速率的原位测定，在每个样方内设置3个重复。PVC环放置时，为防止放置过程对生物土壤结皮结构的破坏，需先在生物土壤结皮表层喷洒一定量的水分，至生物土壤结皮完全浸透，然后将PVC环垂直压入土壤，且PVC环上部露出土壤4 cm左右，试验样地的布置于2017年10月完成。

2.2 生物土壤结皮-土壤呼吸速率的测定

在冬季、春季、夏季和秋季，利用便携式LI-8100土壤碳通量测量系统连接暗室8100-103进行生物土壤结皮-土壤呼吸速率的测定。分别在不同的季节选取晴朗的天气（为避免降水对测定结果的影响，测定前7 d无降水），将8100-103置于PVC环上，从每天的7:00开始至次日的7:00结束，每2 h将全部处理测定1次，每次工作时长为3.5 min，其中测定前后主机内部气体交换时间分别为45 s，生物土壤结皮-土壤呼吸速率的测量时长为2 min。

2.3 相关环境因子的测定

相关研究表明，空气温湿度、光合有效辐射和土壤温度与湿度对生物土壤结皮-土壤的呼吸影响较大[42]。试验期间，夏季和秋季采用5TM土壤温湿度传感器（METER公司，美国）以地表为基点测定2 cm和5 cm处土壤温湿度的变化情况；春季和冬季因土壤温度会出现低于0 ℃的现象，5TM土壤温湿度传感器无法准确测定土壤含水量，因此，采用5TM温湿度传感器测定2 cm和5 cm处土壤温度，采用称重法测定2 cm和5 cm处土壤含水量[54-56]，在生物土壤结皮-土壤呼吸测定的同时，分别采集2 cm和5 cm处的土壤并立刻称重，称重采用精度为0.01 g的电子天平，将铝盒带回实验室后，烘箱105 ℃烘至恒重；采用QSO-S PAR光合有效辐射传感器（METER公司，美国）和ECT空气温度传感器（METER公司，美国）分别测定光合有效辐射和近地层空气温湿度，通过EM50数据采集器（METER公司，美国）进行所有数据的收集，仪器记录的时间间隔为1 h。

2.4 数据处理与分析

不同季节生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量计算公式如下：

$$\text{不同季节生物土壤结皮-土壤}CO_2\text{日释放量}=\left(\frac{R_7+R_9}{2}+\frac{R_9+R_{11}}{2}+\cdots+\frac{R_3+R_5}{2}\right)\times 2\times 3600\times 10^{-6}$$

式中：$R7$、$R9$、$R11$、···、$R5$分别为7:00、9:00、11:00、···至次日5:00的生物土壤结皮-土壤的平均呼吸速率（$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$）[57]。

在生物土壤结皮-土壤呼吸温度敏感性（Q_{10}）的计算中，需先对土壤呼吸与温度之间的关系进行Van't Hoff指数模型拟合：

$$R_s = ae^{bT}$$

式中：R_s为土壤呼吸；T为温度；a为基础呼吸，即0 ℃时的土壤呼吸；b为温度反应系数[58]。拟合完成后获得温度反应系数b，再通过下式确定生物土壤结皮呼吸温度敏感性（Q_{10}）：

$$Q_{10} = e^{10b}$$

数据分析采用SPSS 19.0进行，并进行相关的统计分析（回归分析、显著性分析和因子分析）。相关图表的绘制在Excel 2016中完成。

3 结果与分析

3.1 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率日动态变化过程

由图1可知，不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率在不同季节均呈"单峰"曲线，且均表现为：苔藓结皮-土壤＞藻类结皮-土壤＞流沙；但其最大值出现时间存在差异，春季和夏季，不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率均在每天的13:00左右达到最大值，秋季和冬季，苔藓结皮-土壤呼吸速率在每天的13:00左右达到最大值，但藻类结皮-土壤和流沙的呼吸速率在每天的15:00左右达到最大值，相对于春季和夏季滞后了2 h；其最小值出现时间为每天的3:00—5:00。随季节的变化，不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率均表现为先升高后降低的趋势，其呼吸速率最大值表现为：夏季＞春季＞秋季＞冬季，最小值表现为：夏季＞春季＞秋季和冬季，总体表现为：夏季＞春季＞秋季＞冬季。

3.2 不同季节生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量

不同季节生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量均表现为：苔藓结皮-土壤＞藻类结皮-土壤＞流沙，且在冬季、春季和夏季达到了显著水平（P<0.05）；秋季，苔藓结皮-土壤CO_2日释放量虽大于藻类结皮土壤CO_2日释放量，但未达到显著水平（图2）。春季至冬季，不同类型生物土壤结皮土壤CO_2日释放量呈先升高后降低的趋势，表现为：夏季＞春季＞秋

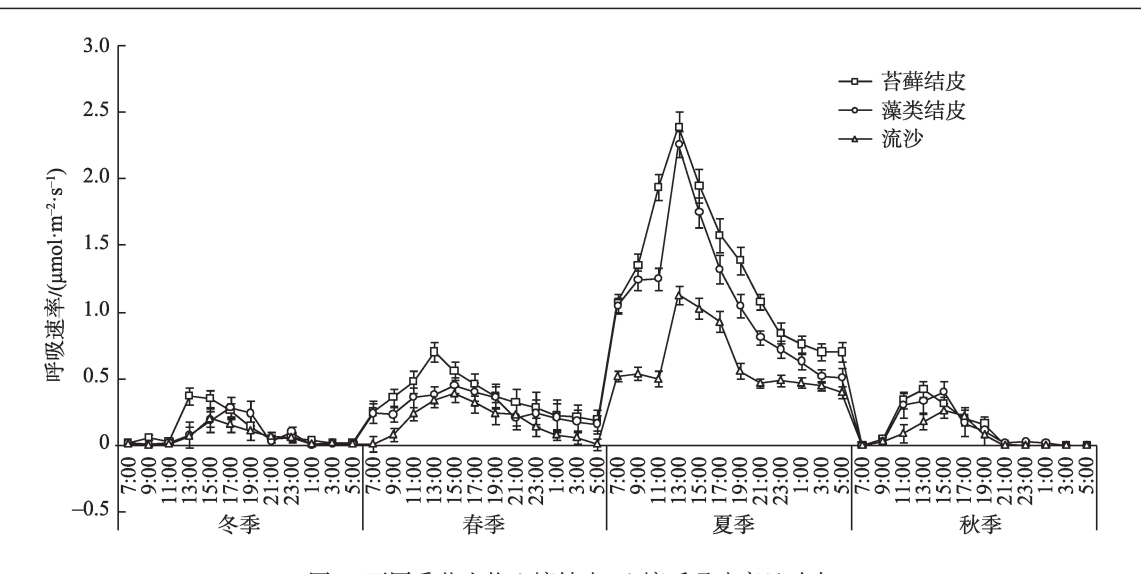


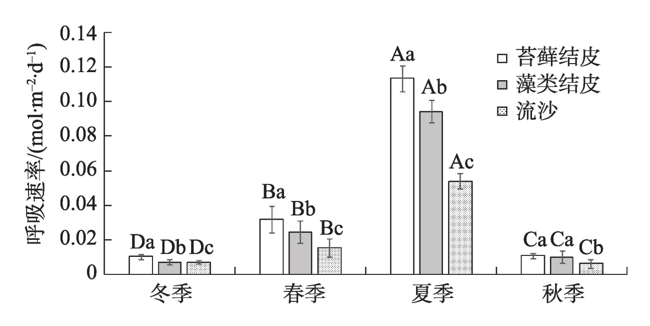
图1 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率日动态

Fig. 1 Daily dynamics of biological soil crusts-soil system respiration rate in different seasons

季>冬季,且达到显著水平(P<0.05;图2)。

3.3 相关环境因子日动态变化过程

光合有效辐射、近地层空气温度、2 cm土壤温度和5 cm土壤温度日动态在不同季节均呈"单峰"曲线(图3);不同季节光合有效辐射在每天的13:00左右出现最高值,在每天的21:00至次日的5:00基本为0;近地层空气温度、土壤2 cm和5 cm温度在每天的15:00左右出现最高值,在每天的5:00左右出现最低值(图3)。随季节的变化,光合有效辐射、近地层空气温度、2 cm土壤温度和5 cm土壤温度均呈先升高后降低的趋势,其最大值、平均值均表现为:夏季>春季>秋季>冬季(图3a,表2)。近地层空气相对湿度在不同季节的日动态均呈先下降后升高的趋势,在15:00—19:00之间出现最小值,其不



注:不同大写字母表示同一结皮类型不同季节间差异显著;不同小写字母表示同一季节不同结皮类型间差异显著(P<0.05);图中数据为平均值±标准差(n=3)。

图2 不同季节生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量

Fig. 2 The daily emission of CO_2 of biological soil crust-soil system in different season

同季节日平均值在夏季较高(图3b,表2)。土壤2 cm和5 cm湿度不同季节日动态较为恒定,2 cm土壤湿度不同季节日均值:夏季>春季>秋季>冬季,5 cm土壤湿度不同季节日均值:春季>夏季>秋季>冬季(图3b,表2)。

3.4 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率与环境因子间的关系

生物土壤结皮-土壤呼吸速率与相关环境因子的PCA分析如图4所示。冬季苔藓结皮-土壤呼吸速率与近地层空气相对湿度、2 cm土壤湿度和光合有效辐射呈正相关关系,与近地层空气温度、2 cm土壤温度、5 cm土壤温度和5 cm土壤湿度呈负相关关系;藻类结皮-土壤和流沙呼吸速率与近地层空气温度、光合有效辐射、2 cm土壤温度、2 cm土壤湿度、5 cm土壤温度和5 cm土壤湿度呈正相关关系,与近地层空气相对湿度呈负相关关系(图4)。春季苔藓结皮-土壤和藻类结皮-土壤呼吸速率与近地层空气相对湿度、光合有效辐射、2 cm土壤湿度、呈正相关关系,与近地层空气温度、2 cm土壤温度和5 cm土壤温度呈负相关关系;流沙呼吸速率与光合有效辐射、2 cm土壤温度、2 cm土壤湿度、5 cm土壤温度和5 cm土壤湿度呈正相关关系,与近地层空气相对湿度和近地层空气温度呈负相关关系(图4)。夏季苔藓结皮-土壤、藻类结皮-土壤和流沙呼吸速率与近地层空气相对湿度、2 cm土壤湿度和光合有效辐射呈正相关关系,与近地层空气温度、2 cm土壤温度、5 cm土壤温度和5 cm土壤湿度呈负相关关系

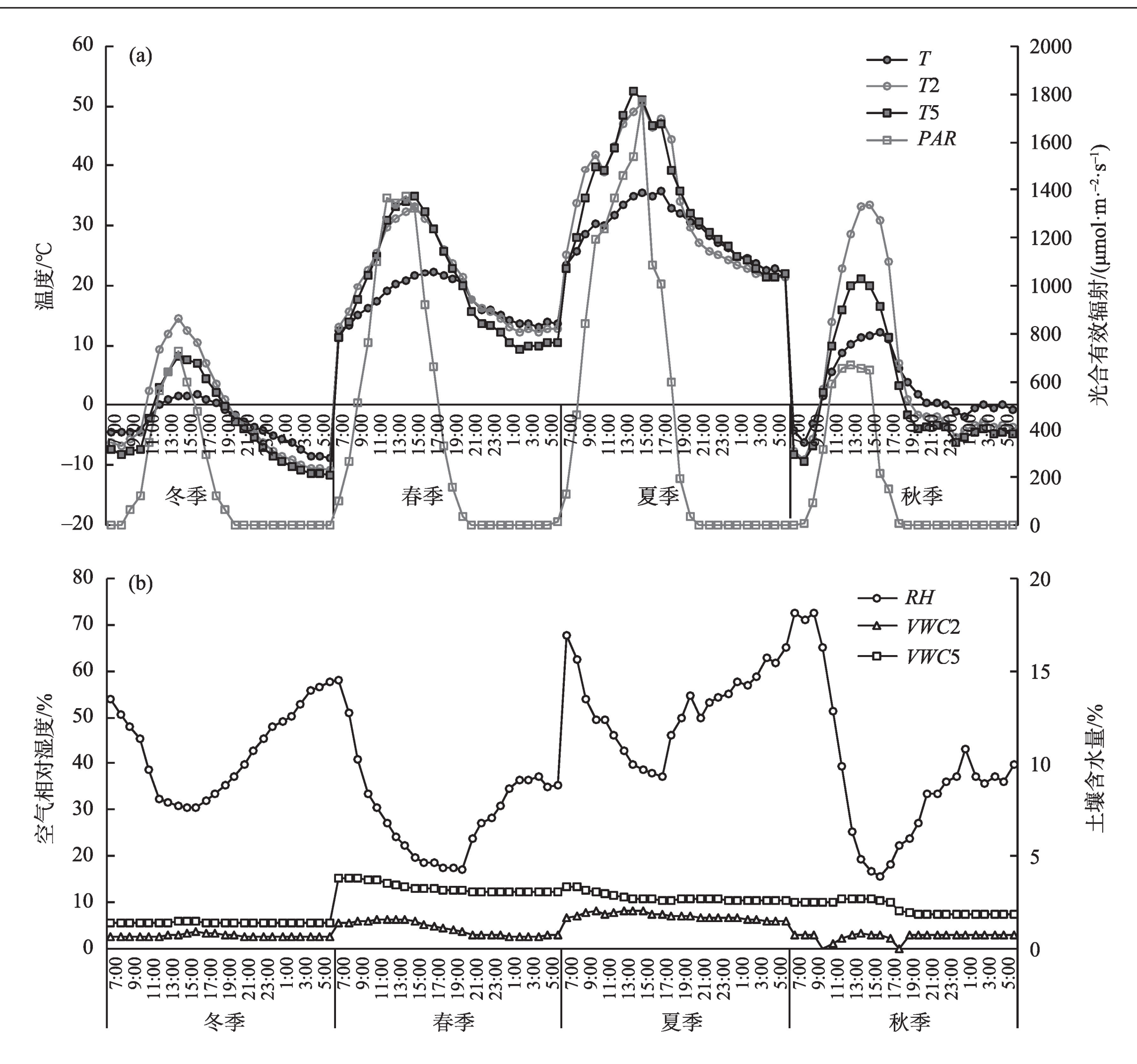


图3　相关环境因子的日动态变化

Fig. 3　Daily dynamic changes of related environmental factors

表2　相关环境因子不同季节日平均值

Tab. 2　Daily mean values of related environmental factors in different seasons

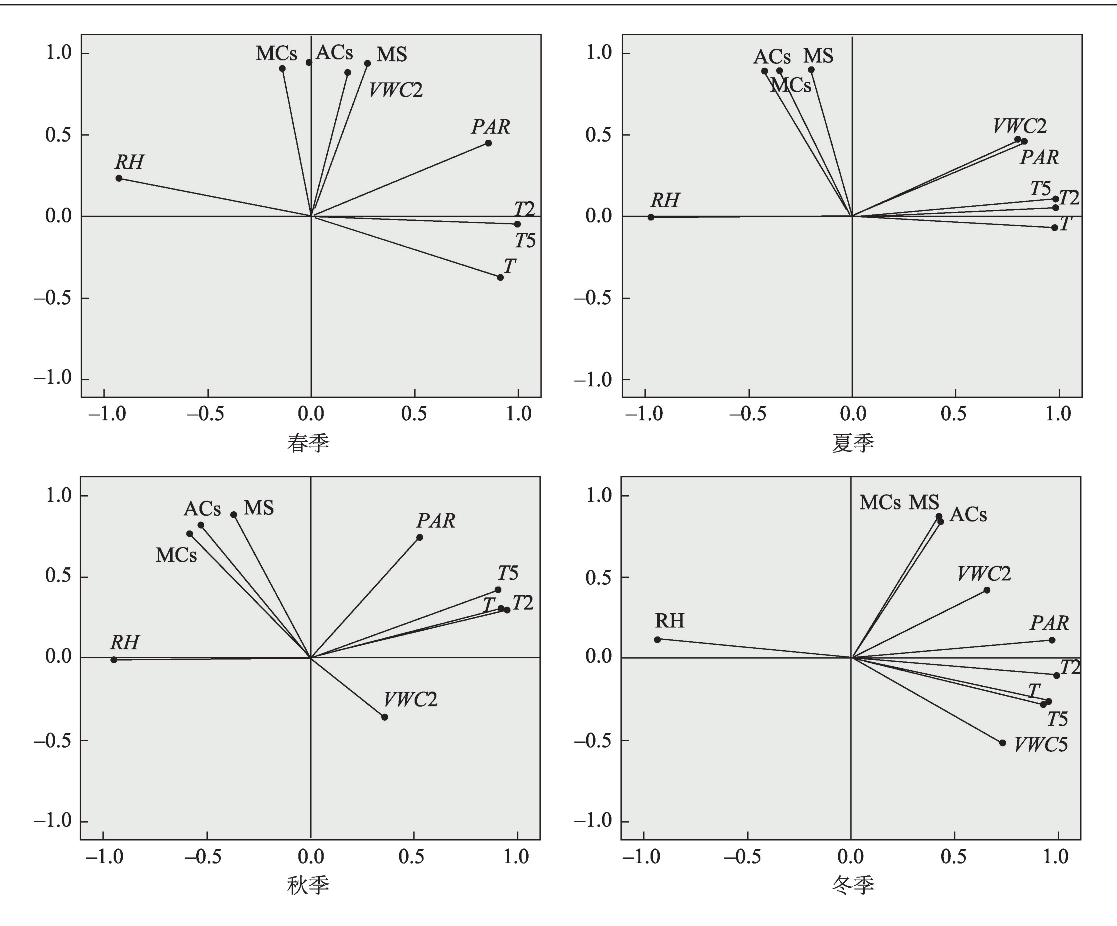
季节	*T*/℃(*CV*)	*T2*/℃(*CV*)	*T5*/℃(*CV*)	*PAR*/(μmol·m⁻²·s⁻¹)(*CV*)	*RH*/%(*CV*)	*VWC2*/%(*CV*)	*VWC5*/%(*CV*)
冬季	−3.2(−104.70%)	−1.4(−568.78%)	−3.8(−175.28%)	167.1(144.87%)	42.90(21.36%)	0.07(8.67%)	1.41(3.23%)
春季	17.1(19.77%)	20.6(35.82%)	19.4(45.71%)	426.9(121.45%)	30.21(34.19%)	1.10(31.28%)	3.32(8.00%)
夏季	28.8(15.33%)	33.6(30.81%)	33.7(29.78%)	537.9(113.96%)	52.23(16.49%)	1.82(9.86%)	2.87(8.16%)
秋季	2.7(198.19%)	5.8(244.15%)	1.8(543.03%)	166.8(153.95%)	38.04(44.63%)	0.07(32.88%)	2.25(15.42%)

注:*CV*为变异系数;*T*为近地层空气温度;*T2*为2 cm土壤温度;*T5*为5 cm土壤温度;*PAR*为光合有效辐射;*RH*为近地层空气相对湿度;*VWC2*为2 cm土壤湿度;*VWC5*为5 cm土壤湿度。下同。

(图4)。秋季苔藓结皮-土壤、藻类结皮-土壤和流沙呼吸速率与近地层空气相对湿度和光合有效辐射呈正相关关系,与近地层空气温度、2 cm土壤温度、2 cm土壤湿度、5 cm土壤温度和5 cm土壤湿度呈负相关关系(图4)。不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率的主要影响因子均为2 cm土壤温度,其次为近地层空气湿度,冬季至春季,其与生物土壤结皮-土壤呼吸速率的关系逐渐从正相关转变为负相关(图4)。

3.5　不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸温度敏感性变化情况

通过生物土壤结皮-土壤呼吸速率与相关环境因子的PCA分析可知,2 cm土壤温度是生物土壤结皮-土壤呼吸速率的主要影响因子,因此,采用2 cm土壤温度与生物土壤结皮-土壤呼吸速率建立回归方程,发现指数模型能够较好地描述两者之间的关



注:MCs表示苔藓结皮-土壤,ACs表示藻类结皮-土壤,MS表示流沙。

图4 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸主要影响因子分析

Fig. 4 Main affecting factor analysis of biological soil crust-soil system respiration in different seasons

系(R^2:0.50~0.85;$P<0.01$;表3)。以不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率与2 cm土壤温度的关系等式为基础进行Q_{10}的计算。结果表明:生物土壤结皮-土壤呼吸的Q_{10}变化范围为1.33~3.85;随季节的变化,生物土壤结皮-土壤呼吸的Q_{10}呈先降低后升高的趋势,温度较低的冬季Q_{10}较高,温度较高的夏季Q_{10}较低;同一季节,生物土壤结皮-土壤呼吸的Q_{10}高于流沙。

表3 不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸与2 cm土壤温度间的关系及温度敏感性变化

Tab. 3 The relationship between respiration rate of biological soil crusts-soil system and soil temperature in 2 cm layer in different seasons as well as the change situation of Q_{10}

结皮类型	季节	回归方程	R^2	Q_{10}	P
苔藓结皮	冬季	$y=0.0785e^{0.1194x}$	0.78	3.30	$P<0.01$
	春季	$y=0.1173e^{0.0513x}$	0.85	1.67	$P<0.01$
	夏季	$y=0.3632e^{0.0359x}$	0.84	1.43	$P<0.01$
	秋季	$y=0.0256e^{0.0939x}$	0.70	2.56	$P<0.01$
藻类结皮	冬季	$y=0.0385e^{0.1347x}$	0.67	3.85	$P<0.01$
	春季	$y=0.1138e^{0.0418x}$	0.79	1.52	$P<0.01$
	夏季	$y=0.2673e^{0.039x}$	0.83	1.48	$P<0.01$
	秋季	$y=0.0298e^{0.087x}$	0.79	2.39	$P<0.01$
流沙	冬季	$y=0.0386e^{0.104x}$	0.50	2.83	$P<0.01$
	春季	$y=0.0076e^{0.0492x}$	0.61	1.64	$P<0.01$
	夏季	$y=0.2246e^{0.0286x}$	0.79	1.33	$P<0.01$
	秋季	$y=0.0203e^{0.0843x}$	0.81	2.32	$P<0.01$

4 讨 论

4.1 不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸日动态的差异

生物土壤结皮在干旱、半干旱地区广泛分布，作为一种植物、微生物与土壤相结合而形成的复合体，位于大气与土壤的交界处，其在一定程度上影响着大气与土壤间的碳交换过程，是荒漠生态系统碳通量的重要影响因子之一[30,59-62]。腾格里沙漠沙坡头区、古尔班通古特沙漠、黄土高原等地区[38-42,63]的研究表明，生物土壤结皮-土壤呼吸速率日动态呈"单峰"曲线，这与本研究的结果一致；但呼吸速率日动态峰值出现时间存在差异，腾格里沙漠沙坡头区和古尔班通古特沙漠峰值出现时间为13:00左右，黄土高原地区峰值出现时间为15:00左右，本研究中春季和夏季，不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率均在每天的13:00左右达到最大值，秋季和冬季，苔藓结皮-土壤呼吸速率在每天的13:00左右达到最大值，但藻类结皮-土壤和流沙的呼吸速率在每天的15:00左右达到最大值。不同地区、不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率均存在差异，其原因可能是：生物土壤结皮-土壤呼吸由两部分组成：自养呼吸和异养呼吸，其中自养呼吸主要包括植物根系的呼吸，本研究样地的选择均远离植株2 m，植物根系分布较少，因此不考虑植物根系呼吸对试验结果的影响[64]；异养呼吸主要包括土壤微生物和动物的呼吸[65]。相关研究表明土壤温度是影响土壤异养呼吸的主要影响因子[42,66]，本研究的结果也证实了这一观点。生物土壤结皮-土壤呼吸的最适温度为20~30 ℃，超过或低于最适温度，生物土壤结皮-土壤的呼吸均会受到不同程度的抑制，不同研究区域土壤结构组成和水热条件均存在差异，导致了土壤温度日动态变化情况的差异，造成了不同研究区生物土壤结皮-土壤呼吸速率日峰值出现时间差异。而不同季节苔藓结皮-土壤与藻类结皮土壤和流沙呼吸速率日动态峰值差异的原因：生物土壤结皮对水分含量的变化十分敏感，但对水分的调节能力很差，无法利用下部土壤中的水分[67]，其代谢活动水分主要来源于降水和吸湿凝结水，本研究选取降雨7 d后进行观测，因此，不考虑降水的影响；吸湿凝结水作为除降水外，生物土壤结皮-土壤唯一的水分来源，对其呼吸有十分重要的作用[68]，同时，吸湿凝结水量和耗散过程与近地层空气温湿度和生物土壤结皮-土壤类型密切相关；相对于藻类结皮-土壤和流沙，苔藓结皮-土壤具有较高的微生物种类和数量，同时具有较强的保水能力和水分利用能力[69]，虽然苔藓结皮-土壤的日吸湿凝结水量高于藻类结皮-土壤和流沙[68]，但生物土壤结皮对吸湿凝结水利用率、生物土壤结皮类型对吸湿凝结水蒸散的影响以及季节差异导致的水热条件的不同均会导致吸湿凝结水持续时间的变化[70-71]，从而导致不同季节不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸速率日峰值出现时间的差异。

4.2 温度对生物土壤结皮-土壤呼吸的影响

温度作为影响生物土壤结皮-土壤呼吸的重要非生物影响因子[42,72]。相关研究表明，温度的增加显著提高了干旱苔原生态系统和半干旱荒漠生态系统生物土壤结皮-土壤的呼吸速率[73]，这与本研究结果一致：随季节的变化，即随温度的变化（从冬季开始至秋季结束，近地层空气温度和土壤温度均呈先升高后降低的趋势，在夏季达到最大值），生物土壤结皮-土壤呼吸速率表现出与温度相同的变化趋势。但在腾格里沙漠沙坡头区天然植被区的研究表明：增温降低了苔藓结皮-土壤和藻类结皮-土壤的呼吸速率[38]，这与本研究的结果存在差异。其原因是：虽然温度的升高有利于土壤浅表层微生物的活性和酶的催化作用，起到加速土壤有机质分解[74]，增加土壤呼吸速率的作用；但干旱、半干旱地区，水分同样是限制生态过程的主要影响因子，土壤酶和微生物活性、土壤有机质的分解过程均受土壤含水量的控制[75-76]，温度的升高，增加了土壤中可利用水分的蒸散，降低了土壤可利用有效水分，抑制了土壤酶和微生物活性，不利于有机质的分解过程，进而对土壤呼吸产生影响。本研究位于毛乌素沙地，年均降水量265 mm，远高于腾格里沙漠沙坡头区（年均降水量186 mm），水分条件对生物土壤结皮-土壤呼吸的限制低于腾格里沙漠沙坡头区，因此，毛乌素沙地生物土壤结皮-土壤呼吸速率：夏季＞春季＞秋季＞冬季。

4.3 生物土壤结皮-土壤呼吸温度敏感性

土壤呼吸对温度变化的敏感性受土壤生态系统组成和气候带的影响[77]，是全球碳循环和气候变化之间反馈关系的重要影响因子[78]。相关研究表明，随温度的升高，土壤呼吸温度敏感性呈降低趋

势[74,79-80]，其主要原因是温度的升高抑制了土壤微生物和酶的活性，降低了土壤可利用有效水分，不利于土壤中各个生态过程的进行，从而降低了土壤呼吸温度敏感性，这与本研究的结果一致。但部分研究发现，随温度的升高，土壤呼吸温度敏感性呈上升趋势，这与本研究的结果不同[81-84]，原因是土壤呼吸作用不仅受到土壤温度的影响，土壤水分条件同样会影响土壤呼吸过程，当土壤水分条件良好时，较好的水分条件有利于土壤有机质的分解，其对土壤呼吸的促进作用抵消了温度增加对土壤呼吸的抑制作用，导致土壤呼吸温度敏感性的增加[84]；在森林生态系统和亚热带草原生态系统的研究也证实了在适宜条件下，土壤水分条件较差，导致土壤呼吸温度敏感性的降低，而土壤水分的增加，可以显著增加土壤呼吸的温度敏感性[85]，本研究区位于毛乌素沙地，属于典型的荒漠生态系统，且实验选取时间为降雨后一周进行，土壤水分含量较低，因此，本研究中随季节的变化，生物土壤结皮-土壤温度敏感性：冬季＞秋季＞春季＞夏季。

5 结 论

本研究通过对毛乌素沙地不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率的日动态测定，同时结合相关环境因子，得到以下结论：

（1）不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸速率的日动态均呈“单峰”曲线，峰值出现时间为：13:00—15:00。

（2）同一季节，不同类型生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量：苔藓结皮＞藻类结皮＞流沙，且达到显著水平（$P<0.05$）；不同季节生物土壤结皮-土壤CO_2日释放量：夏季＞春季＞秋季＞冬季，且达到显著水平（$P<0.05$）。

（3）主成份分析结果表明，不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的主要影响因子为2 cm土壤温度，其次为近地层空气湿度。

（4）不同季节生物土壤结皮-土壤呼吸的温度敏感性存在差异，主要表现为：冬季＞秋季＞春季＞夏季，即温度越高，其温度敏感性越低。

参考文献（References）：

[1] Veretenenko S V, Ogurtsov M G. 60-year cycle in the earth's climate and dynamics of correlation links between solar activity and circulation of the lower atmosphere: new data[J]. Geomagnetism and Aeronomy, 2019, 59(7): 908-917.

[2] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.]

[3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-99.

[4] Ito A. Soil organic carbon storage as a function of the terrestrial ecosystem with respect to the global carbon cycle[J]. Japanese Journal of Ecology, 2002, 52: 189-227.

[5] Ito A. The regional carbon budget of east Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2008, 148(5): 738-747.

[6] Zha J, Zhuang Q. Microbial dormancy and its impacts on northern temperate and boreal terrestrial ecosystem carbon budget[J]. Biogeosciences, 2020, 17(18):4591-4610.

[7] 熊沛, 徐振锋, 林波,等. 岷江上游华山松林冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(12):15-22. [Xiong Pei, Xu Zhenfeng, Lin Bo, et al. Short-term response of winter soil respiration to simulated warming in a Pinus armandii plantation in the upper reaches of the Minjiang River, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(12):15-22.]

[8] 王珍, 赵萌莉, 韩国栋,等. 模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9):98-103. [Wang Zhen, Zhao Mengli, Han Guodong, et al. Response of soil respiration to simulated warming and N addition in the desert steppe[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9):98-103.]

[9] 陈宁. 多梯度增温对青藏高原高寒草甸生态系统碳通量的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020. [Chen Ning. Effects of Multi-gradient Warming on Carbon Fluxes in Alpine Meadow Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.]

[10] Garcia P F, Belnap J, Neuer S, et al. Estimates of global cyanobacterial biomass and its distribution[J]. Algological Studies, 2003, 109(1): 213-227.

[11] Yang R, Kong J Q, Du Z Y, et al. Altitude pattern of carbon stocks in desert grasslands of an arid land region[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 10(5): 404-412.

[12] Zhu S, Li C, Shao H, et al. The response of carbon stocks of drylands in Central Asia to changes of CO_2 and climate during past 35 years[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 687(15): 330-340.

[13] Eldridge D, Greene R. Microbiotic soil crusts- a review of their

roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. Soil Research, 1994, 32(3): 389–415.

[14] Lan S, Wu L, Zhang D, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China)[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(1): 77–88.

[15] Burkhard Büdel, Colesie C. Biological Soil Crusts [J]. Biodiversity and Conservation, 2014: 131–161.

[16] Romero A L N, Moratta M A H, Carretero E M, et al. Spatial distribution of biological soil crusts along an aridity gradient in the central-west of Argentina[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 176: doi: 10.1016/j.jaridenv.2020.104099.

[17] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions[J]. Advances in Ecological Research, 1990, 20:179–223.

[18] Escolar, Cristina, Martinez Isabel, Bowker Matthew A, et al. Warming reduces the growth and diversity of biological soil crusts in a semi-arid environment: implications for ecosystem structure and functioning[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2012, 367(1606): 87–99.

[19] Xiao B, Hu K L, Ren T S, et al. Moss-dominated biological soil crusts significantly influence soil moisture and temperature regimes in semiarid ecosystems[J]. Geoderma, 2016, 263: 35–46.

[20] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China[J]. Geoderma, 2011, 160(3–4): 367–372.

[21] Bu C F, Zhang P, Wang C, et al. Spatial distribution of biological soil crusts on the slope of the Chinese loess plateau based on canonical correspondence analysis[J]. Catena, 2016, 137: 373–381.

[22] Li X R, Jia R L, Zhang Z S, et al. Hydrological response of biological soil crusts to global warming: A ten-year simulative study[J]. Global Change Biology, 2018, 24(10): 1–12.

[23] Delgado-Baquerizo M, Morillas L, Maestre F T, et al. Biocrusts control the nitrogen dynamics and microbial functional diversity of semi-arid soils in response to nutrient additions[J]. Plant and Soil, 2013, 372(1–2): 643–654.

[24] Housman D C, Powers H H, Collins A D, et al. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 66(4): 620–634.

[25] Li X R, Zhang P, Su Y G, et al. Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: A four-year field study[J]. Catena, 2012, 97: 119–126.

[26] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA[J]. Biology and Fertility Soils, 2002, 35(2): 128–135.

[27] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. Hydrological Processes, 2010, 20(15): 3159–3178.

[28] Emilio Rodríguez-Caballero, Yolanda Cantón, Chamizo S, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion[J]. Geomorphology, 2012, 145-146: 81–89.

[29] Hu C, Liu Y, Song L, et al. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands [J]. Hydrobiologia, 2002, 14(4): 281–292.

[30] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11–24. [Li Xinrong, Zhang Yuanming, Zhao Yunge. A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(1): 11–24.]

[31] 李新荣, 谭会娟, 回嵘,等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2320–2334. [Li Xinrong, Tan Huijuan, Hui Rong, et al. Researches in biological soil crust of China: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(23): 2320–2334.]

[32] Harley P C, Tenhunen J D, Murray K J, et al. Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra Sphagnum mosses from the foothills of the Philip Smith Mountams[J]. Oecologia, 1989, 79: 251–259.

[33] Zotz C G, Schweikert A, Jetz W, et al. Water relations and gain are closely related to cushion size in the moss grimmia pulvinata[J]. New Phytologist, 2000, 148: 59–67.

[34] Belnap J, Phillips S L, Miller M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency[J]. Oecologia, 2004, 141: 306–316.

[35] Wu L, Zhang Y M, Zhang J, et al. Precipitation intensity is the primary driver of moss crust derived CO_2 exchange: Implication for soil C balance in a temperate desert of northern China[J]. European Journal of Soil Biology, 2015 (67): 27–34.

[36] Lange O L, Meyer A. Net photosynthesis activation of a desiccated cyanobacterium without liquid water in high air humidity alone: experiments with microcoleus sociatus isolated from a desert soil crust[J]. Functional Ecology, 1994, 8: 52–57.

[37] Zaady E, Kuhn U, Willske B, et al. Patterns of CO_2 change in biological soil crusts of successional age[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 959–966.

[38] Li X J, Zhao Y, Yang H T, et al. Biologically-crusted soil respiration in response to simulated precipitation pulses in the Tengger Desert, Northern China[J]. Pedosphere, 2017, 28(1): doi: 10.1016/S1002–0160(17)60307–2.

[39] Su Y G, Wu L, Zhou Z B, et al. Carbon flux in deserts depends on soil cover type: A case study in the Gurbantunggute desert, North China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58:332–340.

[40] Su Y G, Wu L, Zhang Y M. Characteristics of carbon flux in two biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China[J]. Catena, 2012 (96):41–48.

[41] Li X J, Zhao Y, Yang H T, et al. Soil respiration of biologically-crusted soils in response to simulated precipitation pulses in the Tengger Desert, Northern China[J]. Pedosphere, 2018, 28(1):105–115.

[42] 李炳垠, 卜崇峰, 李宜坪, 等. 毛乌素沙地生物结皮覆盖土壤碳通

量日动态特征及其影响因子[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 174–180. [Li Bingyin, Bu Chongfeng, Li Yiping, et al. Diurnal dynamic characteristics and influencing factors of the carbon flux in biocrusted soil in Mu Us sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 174–180.]

[43] Su Y G, Wu L, Zhou Z B, et al. Carbon flux in deserts depends on soil cover type: A case study in the Gurbantunggute desert, North China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 332–340.

[44] 辜晨, 贾晓红, 吴波, 等. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳通量对模拟降水的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 1–11. [Gu Chen, Jia Xiaohong, Wu Bo, et al. Effect of simulated precipitation on the carbon flux in biological-soil crusted soil in alpine sandy habitats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 1–11.]

[45] 赵洋, 齐欣林, 陈永乐, 等. 极端降雨事件对不同类型生物土壤结皮覆盖土壤碳释放的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 543–548. [Zhao Yang, Qi Xinlin, Chen Yongle, et al. Effects of extreme rainfall events on the carbon release of biological soil crusts and the covered soil in fixed Sand dunes in the Tengger desert, northern China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 543–548.]

[46] Guan C, Zhang P, Chen Y L, et al. Response of biocrust-soil system respiration to winter low temperature and simulated warming [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3213–3220.

[47] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 等. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 391–397. [Xie Shenqi, Gao Liqian, Zhao Yunge, et al. Responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity under simulated rainfall[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 391–397.]

[48] 韩海燕. 高寒沙地生物结皮碳释放及其对土壤呼吸的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014. [Han Haiyan. Carbon Release from Biological Crust and Its Effect on Soil Respiration in Alpine Sandy Land[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.]

[49] 张春平. 生物土壤结皮对典型草原地表CO_2通量的贡献及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Zhang Chunping. Contribution of Biological Soil Crust to Surface CO_2 Flux in Typical Steppe and Its Influencing Factors[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[50] 管超, 张鹏, 陈永乐, 等. 生物结皮–土壤呼吸对冬季低温及模拟增温的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3213–3220. [Guan Chao, Zhang Peng, Chen Yongle, et al. Response of biocrust-soil system respiration to winter low temperature and simulated warming[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (10): 3213–3220.]

[51] Hui R, Li X R, Chen C Y, et al. Responses of photosynthetic properties and chloroplast ultrastructure of Bryum argenteum from a desert biological soil crust to elevated ultraviolet-B radiation[J]. Physiologia Plantarum, 2013, 147(4): 489–501.

[52] Meeßen J, Sánchez F J, Brandt A, et al. Extremotolerance and resistance of lichens: Comparative studies on five species used in astrobiological research I. Morphological and anatomical characteristics[J]. Origins of Life & Evolution of Biospheres, 2013, 43(3):283–303.

[53] Kappen L, Lange O L. Die kalteresistenz einiger makrolichenen[J]. Flora, 1972, 161: 1–29.

[54] Dong J, Ochsner T E. Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns[J]. Water Resources Research, 2018, 54(3): 2199–2211.

[55] 毛丽, 苏志珠, 王国玲, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型的土壤粒度及有机质特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 589–598. [Mao Li, Su Zhizhu, Wang Guoling, et al. Soil particle size and organic matter content of different land use types in the Mu Us sandland[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 589–598.]

[56] 李宽, 熊鑫, 王海兵,等. 内蒙古西部高频沙尘活动空间分布及其成因[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 657–663. [Li Kuang, Xiong Xin, Wang Haibing, et al. Spatial distribution and formation causes of frequent dust weather in west Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 657–663.]

[57] Chang S X, Shi Z, Thomas B R. Soil respiration and its temperature sensitivity in agricultural and afforested poplar plantation systems in northern Alberta[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52 (5):629–641.

[58] Pennington S C, Mcdowell N G, Megonigal J P, et al. Localized basal area affects soil respiration temperature sensitivity in a coastal deciduous forest[J]. Biogeosciences, 2020, 17(3): 771–780.

[59] Grote E E, Belnap J, Housman D C, et al. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change[J]. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2763–2774.

[60] Feng W, Zhang Y, Wu B, et al. Influence of environmental factors on carbon dioxide exchange in biological soil crusts in desert areas [J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 2014, 28(2): 186–196.

[61] Kheirfam H. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 172: doi: 10. 1016/j. jaridenv. 2019. 104022.

[62] Tucker C L, Ferrenberg S, Reed S C. Climatic sensitivity of dryland soil CO_2 fluxes differs dramatically with biological soil crust successional state[J]. Ecosystems, 2019, 22(1): 15–32.

[63] Schaub I, Baum C, Schumann R, et al. Effects of an early successional biological soil crust from a temperate coastal sand dune (NE Germany) on soil elemental stoichiometry and phosphatase activity [J]. Microbial Ecology, 2019, 77: 217–229.

[64] Tiruvaimozhi Y V, Sankaran M. Soil respiration in a tropical montane grassland ecosystem is largely heterotroph-driven and increases under simulated warming[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276: doi: 10. 1016/j. agrformet. 2019. 107619 .

[65] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315–323.

[66] Vidya, Suseela, Richard, et al. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment[J]. Global Change Biology, 2012, 18: 336-348.

[67] Pan Z, Pitt W G, Zhang Y M, et al. The upside-down water collection system of Syntrichia caninervis[J]. Nature Plants 2016, 2: 1-5.

[68] 成龙, 贾晓红, 吴波,等. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖区凝结水组分分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 439-447. [Cheng Long, Jia Xiaohong, Wu Bo, et al. Composition analysis of vondensation water in biological soil crusts covering area in alpine sandy lands[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 439-447.]

[69] Wang W X, Cheng R M, Shi Z M, et al. Seasonal dynamics of soil respiration and nitrification in three subtropical plantations in southern China[J]. Iforest, 2016, 9: 813-821.

[70] 成龙, 贾晓红, 吴波, 等. 高寒沙区生物土壤结皮对吸湿凝结水的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 118-127. [Cheng Long, Jia Xiaohong, Wu Bo, et al. Effects of biological soil crusts on the characteristics of hygroscopic and condensate water deposition in alpine sandy lands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 118-127.]

[71] 潘颜霞, 王新平, 张亚峰, 等. 沙坡头地区吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 653-658. [Pan Yanxia, Wang Xinping, Zhang Yafeng, et al. Ecological effect of hygroscopic and condensate water on biological soil crusts in Shapotou region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 653-658.]

[72] Noy-Meir I. Desert ecosystems: Environment and producers[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(1): 25-51.

[73] Maestre F T, Escolar C, Guevara Mónica Ladrón, et al. Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands[J]. Global Change Biology, 2014, 19(12): 3835-3847.

[74] Luo C Y, Xu G P , Chao Z G, et al. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau[J]. Global Change Biology, 2010, 16(5): 1606-1617.

[75] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨量改变对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2018, 39(13): 4806-4820. [Li Xinge, Han Guangxuan, Zhu Lianqi, et al. Effects of changes in precipitation on soil respiration in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 39(13): 4806-4820.]

[76] 冯薇. 毛乌素沙地生物结皮光合固碳过程及土壤碳排放的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. [Feng Wei. Effects of Photosynthetic Carbon Sequestration and Soil Carbon Emissions in Biological Crusts on Mu Us Sandy Land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.]

[77] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, et al. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation[J]. Plant & Soil, 1998, 205(2): 135-146.

[78] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311. [Yang Qinpeng, Xu Ming, Liu Hongsheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311.]

[79] 邵蕊, 赵苗苗, 赵芬, 等. 施肥对油茶园土壤呼吸和异养呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2315-2322. [Shao Rui, Zhao Miaomiao, Zhao Fen, et al. Effects of fertilization on soil respiration, heterotrophic respiration, and temperature sensitivity in an oil tea plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2315-2322.]

[80] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan Forest[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(3): 687-696.

[81] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest[J]. Global Change Biology, 2010, 9(6): 911-918.

[82] Almagro M, J López, Querejeta J I, et al. Temperature dependence of soil CO_2 efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a mediterranean ecosystem[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(3): 594-605.

[83] Reichstein M, Subke J A, Angeli A C, et al. Does the temperature sensitivity of decomposition vary with soil organic matter quality[J]. Biogeoences Discussions, 2005, 2(10): 1754-1767.

[84] Zhao J X, Luo T X, Wei H X, et al. Tang YH. Increased precipitation offsets the negative effect of warming on plant biomass and ecosystem respiration in a Tibetan alpine steppe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279: 1-10.

[85] Mcculley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 820-828.

Seasonal variation characteristics of different types of biological soil crust-soil system respiration in Mu Us Sandy Land

WANG Rongnv

(Northwest Surveying, Planning and Design Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Biological soil crust is an important type of surface cover in arid and semi-arid areas, and it is an important component of the carbon cycle in desert ecosystems. However, research on seasonal changes in biological soil crust-soil system respiration is still very scarce, and it is difficult to accurately assess the carbon cycle processes of desert ecosystems over time. We examined the well-developed moss crust and algae crust in the southwest of Mu Us Sandy land in 2018, and we used moving sand as a control. The soil carbon flux measurement system was used to observe the daily dynamics of respiration of the biological soil crust-soil system in different seasons. The relationship between biological soil crust-soil system respiration and environmental factors was explored, and the effects of seasonal changes on biological soil crust-soil CO_2 release and temperature sensitivity were analyzed. The results showed that there was a single peak in the biological soil crust-soil system respiration rate in different seasons, but the timing of the peak varied. The peak time of different types of biological soil crust-soil system respiration rates in spring and summer was 13:00, but in winter and autumn, the algae crust-soil system and moving sand respiration rate appeared around 15:00, lagging behind spring and summer by 2 h. In the same season, different types of biological soil crust-soil systems released different amounts of CO_2: moss crust>algae crust>moving sand ($P<0.05$). With the change of season, the amount of CO_2 released by the biological soil crust-soil systems first increased and then decreased, and the pattern mainly manifested as: summer>spring>autumn>winter ($P<0.05$). By analyzing the principal components of the biological soil crust-soil system respiration rate and environmental factors, we found that compared with the 5 cm temperature, the 2 cm soil temperature was the primary influencing factor of biological soil crust-soil system respiration in different seasons. The relationship between the biological soil crust-soil system respiration rate and the 2 cm soil temperature in different seasons showed a good fit with the exponential model. Based on this function, the temperature sensitivity of respiration was calculated. It was found that the temperature sensitivity varied from 1.33 to 3.85. With the change in seasons, the temperature sensitivity first decreased and then increased: winter>autumn>spring>summer. Therefore, the higher the temperature, the lower the temperature sensitivity of the biological soil crust-soil system respiration.

Keywords: biological soil crusts; different season; respiration; Mu Us Sandy Land; temperature sensitivity